

การศึกษาเชิงตัวเลขของการไหลและการแลกเปลี่ยนความร้อนของน้ำ ในระบบระบายความร้อนมอเตอร์ของยานยนต์ไฟฟ้า

Numerical Study of Flow and Heat Transfer of Water in a Motor Cooling System of Electric Vehicle

ศิวกร เกิงฝาก¹ วีรชัย ชัยวรพฤกษ์² แสงกล้า เครือวัลย์³ ชาญเวช ศิลพิพัฒน์⁴ และ
คณศ คัจจสุวรรณมณี^{5*}

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์^{1,2,4,5*}

บริษัท เรียวล บีพีเอ็ม จำกัด³

E-mail: siwakorn.ker@ku.th, fengwcc@ku.ac.th, sk@realpbm.co.th, fengchse@ku.ac.th, kanet.k@ku.th

* ผู้ประพันธ์บรรณกิจ (corresponding author)



บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาเชิงตัวเลขของการไหลและการถ่ายเทความร้อนของน้ำในระบบระบายความร้อนมอเตอร์โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ANSYS-Fluent แบบจำลองสามมิติของน้ำในช่องทางไหลมีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมถูกสร้างขึ้นให้มีความกว้างเท่ากับ 25 มิลลิเมตร สูงเท่ากับ 5.45 มิลลิเมตร และมีระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 10 มิลลิเมตร แบบจำลองความปั่นป่วน Realizable k- ϵ และ Standard wall function ถูกเลือกใช้ในการวิเคราะห์เชิงตัวเลข ผนังร้อนถูกกำหนดเงื่อนไขค่าขอบให้มีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่คงที่เท่ากับ 56,523.15 วัตต์ต่อตารางเมตร น้ำที่ทางเข้าเปลือกมอเตอร์ระบายความร้อนถูกกำหนดให้มีอุณหภูมิเท่ากับ 50 องศาเซลเซียส และมีความเร็วเท่ากับ 2.4 4.8 7.2 9.6 และ 12 ลิตรต่อนาที ผลการวิเคราะห์การไหลและการแลกเปลี่ยนความร้อนของน้ำที่ไหลผ่านเส้นทางการไหลจำนวน 3 รูปแบบ แสดงให้เห็นว่าเส้นทางการไหลของน้ำในระบบระบายความร้อนของมอเตอร์ส่งผลต่ออุณหภูมิที่บริเวณทางออกและความดันสูญเสีย การเปลี่ยนรูปแบบการไหลของน้ำสามารถทำให้เลขนัสเซลล์ต์และค่าตัวประกอบสมรรถนะทางความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นถึง 45.39% และ 31.25% ตามลำดับ ดังนั้นงานวิจัยชิ้นนี้จะเป็นข้อมูลสำคัญที่นำไปสู่การออกแบบและพัฒนาระบบระบายความร้อนของมอเตอร์ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นต่อไปในอนาคต



คำสำคัญ: ระบบระบายความร้อนมอเตอร์; พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ; การถ่ายเทความร้อน; ความดันสูญเสีย; ประสิทธิภาพการระบายความร้อน



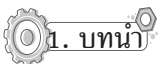
Abstract

This research focuses on a numerical study of water flow and heat transfer in a motor's cooling system using the commercial computational fluid dynamics package, ANSYS-Fluent. A three-dimensional model of water in rectangular was created to have a width of 25 mm, a height of 5.45 mm, and a gap between the channels of 10 mm. The Realizable k- ϵ turbulence

model and Standard wall function were used for the computational analysis. The boundary condition of heating walls was defined to be the constant heat flux of $56,523.15 \text{ W/m}^2$. The water temperature at the entrance of the cooling motor jacket was set to 50°C and the velocity of 2.4, 4.8, 7.2, 9.6, and 12 liters per minute. The numerical results of flow and heat transfer of water in 3 types of flow channels showed that flow patterns in a cooling system affected the outlet temperature and pressure loss. The change in flow pattern caused the increase in the Nusselt number and the thermal performance factor up to 45.39 % and 31.25%, respectively. Therefore, this research will be important information, leading to the design and development of motor cooling systems to be more efficient in the future.



Keywords: Motor cooling system; Computational fluid dynamics; Heat transfer; Pressure loss; Heat transfer efficiency



1. บทนำ

ปัญหาด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมได้ถูกพิจารณาให้เป็นปัญหาใหญ่และมีผลกระทบทั่วโลก ในปัจจุบัน หนึ่งในทางเลือกที่กำลังได้รับความสนใจจากทั้งหน่วยงานภาครัฐและเอกชนทั่วโลก คือการนำยานยนต์ไฟฟ้าเข้ามาแทนที่ยานยนต์ที่ใช้เครื่องยนต์สันดาปภายใน อย่างไรก็ตาม การทำงานของมอเตอร์จะมีการเกิดการสูญเสียพลังงานหลัก คือ พลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นที่ขดลวดและแกนเหล็กที่ถูกเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานความร้อน พลังงานนี้จะถูกถ่ายเทสู่บรรยากาศภายนอกโดยการระบายผ่านเปลือกของมอเตอร์ โดยปกติแล้วปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นนี้จะไม่สามารถถ่ายเทออกได้ทันทีก่อให้เกิดความร้อนสะสมภายใน จึงจำเป็นต้องมีการเพิ่มสมรรถนะการระบายความร้อนออกจากมอเตอร์ ซึ่งกระทำได้หลายวิธี เช่น การเพิ่มอัตราการไหลของอากาศรอบ ๆ มอเตอร์โดยการใช้พัดลมเป่าอากาศผ่านเปลือกมอเตอร์ การเพิ่มพื้นที่สัมผัสแลกเปลี่ยนความร้อนโดยการทำความเย็นที่เปลือกมอเตอร์ หรือใช้ตัวนำความร้อนที่มีคุณสมบัติดีกว่าอากาศ ระบายความร้อนด้วยของเหลวเป็นทางเลือกที่ได้รับความนิยมอย่างมากแต่รูปแบบของช่องทางไหลของน้ำภายในเปลือกของมอเตอร์จะต้องมีความเหมาะสมกับสภาพการไหลของของไหลภายในนั้น

การออกแบบช่องทางการไหลของน้ำให้มีความซับซ้อนและเหมาะสมจะสามารถช่วยเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนได้ การใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamic, CFD) จึงถูกนำมาใช้คำนวณและวิเคราะห์อัตราการไหลของน้ำที่เพียงพอต่อการระบายความร้อน เพื่อนำผลที่ได้ไปออกแบบช่องทางการไหลของน้ำในระบบระบายความร้อนของมอเตอร์ให้มีประสิทธิภาพสูงที่สุด [1-4]

ในปี 2018 Rehman และ Seong [5] ได้วิเคราะห์อุณหภูมิของน้ำที่ไหลในช่องทางการไหลเชิงตัวเลขโดยการตรวจสอบตัวแปรที่มีผลต่อการระบายความร้อน ซึ่งมีตัวแปรที่น่าสนใจ คือ จำนวนรอบของช่องทางการไหลของน้ำ อัตราการไหลโดยปริมาตรตั้งแต่ 5 - 30 ลิตรต่อนาที และรูปแบบทางเข้าและทางออกของท่อจำนวน 3 รูปแบบ โดยจำนวนขดท่อภายในส่วนเปลือกของมอเตอร์ซึ่งจะมีการศึกษาในช่วง 4 - 10 รอบด้วยการเพิ่มครั้งละ 2 รอบ และให้มีอัตราการไหลอยู่ในช่วง 5 - 30 ลิตรต่อนาที พบว่าที่อัตราการไหลเท่ากับ 10 ลิตรต่อนาที และที่จำนวนขดท่อเท่ากับ 4 6 8 และ 10 รอบนั้น อุณหภูมิสูงสุดจะเกิดขึ้นบริเวณสเตเตอร์และจะลดลงตามการเพิ่มขึ้นของจำนวนรอบ

ทางเดินน้ำ แต่พบว่าข้อเสียของการเพิ่มจำนวนรอบทางเดินน้ำนั้นจะทำให้เกิดการสูญเสียความดันเพิ่มมากขึ้นซึ่งนำไปสู่การใช้กำลังของเครื่องสูบน้ำมากขึ้นด้วย จากการศึกษาผลกระทบที่เกิดจากอัตราการไหลที่เปลี่ยนไปพบว่า การเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลส่งผลต่อการลดอุณหภูมิสูงสุดของมอเตอร์อย่างมากและวิธีการเพิ่มอัตราการไหลนั้นมีประสิทธิภาพในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนมากกว่าการเพิ่มจำนวนชุดอีกด้วย แต่การเพิ่มของอัตราการไหลส่งผลให้มีการใช้กำลังของเครื่องสูบน้ำมากขึ้น จากการศึกษาทำให้ทราบว่ารูปแบบของช่องทางไหลและอัตราการไหลของน้ำในส่วนเปลือกของมอเตอร์จะส่งผลกระทบโดยตรงต่อสมรรถนะการระบายความร้อนของมอเตอร์และนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ของยานยนต์ไฟฟ้า ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอการออกแบบเชิงตัวเลขของเส้นทางไหลของน้ำในส่วนเปลือกของมอเตอร์จำนวน 3 รูปแบบ ผลที่ได้จะถูกนำเสนอในรูปของความสามารถของการระบายความร้อนและค่าความดันสูญเสียเนื่องจากการไหลที่เปลี่ยนแปลงไปตามรูปแบบของเส้นทางไหลและอัตราการไหลของน้ำ ซึ่งข้อมูลที่ได้จะนำไปสู่การออกแบบช่องทางไหลของน้ำในส่วนระบายความร้อนมอเตอร์ของยานยนต์ไฟฟ้าต่อไปได้ในอนาคต

2 วิธีการวิจัย

2.1 การสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลข

งานวิจัยนี้มีการใช้โปรแกรมทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในการวิเคราะห์การไหลของน้ำในช่องทางไหลภายในส่วนระบายความร้อนมอเตอร์ของยานยนต์ไฟฟ้า โดยจะมีการคำนวณสมการความต่อเนื่อง (Continuity equation) สมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes equation) และสมการพลังงาน (Energy equation) ดังนี้

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \quad (1)$$

เมื่อ ρ คือความหนาแน่นของของไหล (kg/m^3) t คือเวลา (s) และ $\mathbf{V}$ คือเวกเตอร์ความเร็ว (m/s)

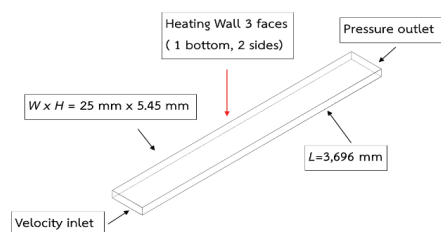
$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \nabla^2 \mathbf{V} + \mathbf{F} \quad (2)$$

เมื่อ ρ คือความดันสถิต (N/m^2) $\mathbf{F}$ คือเวกเตอร์ของแรง (N) และ ν คือความหนืดจลน์ของของไหล (m^2/s)

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla T \right) = k \nabla^2 T + S \quad (3)$$

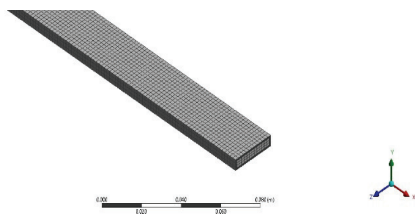
เมื่อ C_p คือ ค่าความจุความร้อน (J/kg.K) T คืออุณหภูมิ (K) k คือค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/m.k) และ S คือพจน์ของแหล่งพลังงาน (W/m^3)

โครงการวิจัยนี้ในเบื้องต้นจะมีการทดสอบหาขนาดของตาข่ายข้อมูลที่เหมาะสม (Mesh sensitivity) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์การไหลและการถ่ายเทความร้อนของน้ำที่ไหลในระบบระบายความร้อนของมอเตอร์ของยานยนต์ไฟฟ้า ช่องทางไหลของน้ำในระบบระบายความร้อนของเปลือกมอเตอร์จึงถูกนำมาใช้เป็นตัวตรงรูปสี่เหลี่ยมที่มีขนาดความกว้างเท่ากับ 25 มิลลิเมตร ความสูงเท่ากับ 5.45 มิลลิเมตร และความยาวเท่ากับ 3,696 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 1 เพื่อลดความซับซ้อนของการคำนวณและไว้สำหรับการสอบเทียบความแม่นยำของแบบจำลองในขั้นตอนถัดไป



ภาพที่ 1 โดเมนการไหลของน้ำในท่อสี่เหลี่ยมเพื่อทดสอบหาขนาดของตาข่ายข้อมูลที่เหมาะสม

เงื่อนไขค่าขอบ (Boundary conditions) ที่ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้จะถูกกำหนดจากสภาวะการทำงานจริงของมอเตอร์สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าที่ถูกออกแบบโดยบริษัท เรียวล ปิพีเอ็ม จำกัด ที่ทางเข้าจะถูกกำหนดให้เป็นความเร็วขาเข้าเท่ากับ 1.47 เมตรต่อวินาที ซึ่งตรงกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรเท่ากับ 12 ลิตรต่อนาที และที่ทางเข้านี้จะมีการกำหนดให้ห้มีอุณหภูมิเท่ากับ 50 องศาเซลเซียส ผิวด้านข้างและด้านล่างถูกกำหนดให้ม้อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่คงที่เท่ากับ $56,523.15 \text{ วัตต์ต่อตารางเมตร}$ ขณะที่ทางออกของท่อถูกกำหนดให้ม้อค่าความดันคงที่เท่ากับ 0 ปาสกาล หรือม้อค่าเท่ากับความดันบรรยากาศ แบบจำลองความปั่นป่วนถูกกำหนดให้เป็น Realizable $k-\epsilon$ และการคำนวณได้ถูกกำหนดเป็น Pressure-based solver เนื่องจากการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ ในส่วนของ Spatial discretization ของความดัน โมเมนตัม พลังงาน k และ ϵ ได้มีการใช้กระบวนการ Second order upwind เพื่อเพิ่มความแม่นยำของการคำนวณ การคำนวณทั้งหมดจะหยุดเมื่อค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการคำนวณมีค่าต่ำกว่า 10^{-5} ในการวิเคราะห์เชิงตัวเลขนี้มีการใช้ตาข่ายข้อมูลแบบ Multizone โดยทำให้บริเวณของผิวท่อทดสอบมีความละเอียดมากกว่าปกติ โดยมีจำนวน 5 ชั้น และมีขนาดของตาข่ายข้อมูลค่าแปรผันตั้งแต่ 1.76 ไปจนถึง 3.50 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 2 และได้มีการกำหนดจำนวนตาข่ายข้อมูล (Number of elements) ทั้งหมด 9 ค่า เพื่อนำมาใช้ในการหาขนาดของตาข่ายข้อมูลที่เหมาะสมจากการเปรียบเทียบอุณหภูมิของน้ำที่ทางออก ดังแสดงในตารางที่ 1



ภาพที่ 2 ภาพตาข่ายข้อมูลแบบ Multizone

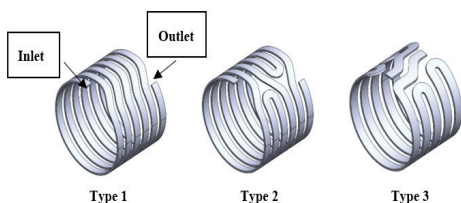
ตารางที่ 1 ขนาดและจำนวนตาข่ายข้อมูลของแบบจำลอง

ขนาด ตาข่าย ข้อมูล (มิลลิเมตร)	จำนวน ตาข่าย ข้อมูล	อุณหภูมิ ทางออก (องศา เซลเซียส)	อุณหภูมิ ผนังท่อ (องศา เซลเซียส)
1.76	472,500	59.17	63.2
1.80	435,450	59.17	
1.85	423,580	59.18	
1.90	376,510	59.17	
1.95	367,550	59.17	
2.00	359,200	59.17	
2.50	234,880	59.17	
3.00	157,700	59.15	
3.50	122,500	59.15	

จากตารางข้างต้นพบว่าจำนวนตาข่ายข้อมูล ที่มากกว่าหรือเท่ากับ 234,880 เอลิเมนต์ จะส่งผลให้ อุณหภูมิของน้ำที่ทางออกคงที่ ดังนั้นขนาดของตาข่าย ข้อมูลขนาด 2.5 มิลลิเมตร จะถูกนำมาใช้สำหรับการวิเคราะห์การระบายความร้อนด้วยการใช้น้ำใน เปลือกของมอเตอร์ตลอดงานวิจัยนี้

แบบจำลองทางกายภาพ 3 มิติ ของน้ำใน ระบบระบายความร้อนมอเตอร์ไฟฟ้าได้ถูกสร้างขึ้นด้วย โปรแกรมสำเร็จรูปทางด้านกรออกแบบ SolidWorks แบบจำลองนี้ถูกสร้างตามช่องทางไหลของน้ำจริงตาม ขนาดของเปลือกมอเตอร์ยานยนต์ไฟฟ้าต้นแบบ มีรูปร่างเป็นช่องทางไหลสี่เหลี่ยมที่มีความกว้าง 25 มิลลิเมตร สูง 5.45 มิลลิเมตร และมีระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 10 มิลลิเมตร โดยมีการกำหนดแบบจำลองความปั่นป่วน เพื่อการวิเคราะห์เชิงตัวเลขในโปรแกรม ANSYS-Fluent ตามแบบกระบวนการทดสอบหาขนาดของตาข่ายข้อมูล ที่เหมาะสม ในการกำหนดเงื่อนไขค่าขอบนั้น ทางเข้า จะถูกกำหนดให้เป็นความเร็วขาเข้าเท่ากับ 1.47 เมตร

ต่อวินาที ผิวด้านล่างและด้านข้างจะถูกกำหนดให้มีค่าอุณหภูมิคงที่เท่ากับ 63.2 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้มาจากการกำหนดเงื่อนไขค่าขอบแบบอัตราแลกเปลี่ยนความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่คงที่เท่ากับ 56,523.15 วัตต์ต่อตารางเมตรที่การวิเคราะห์ก่อนหน้านี้ การกำหนดเงื่อนไขค่าขอบแบบอุณหภูมิคงที่จะทำให้การคำนวณสามารถดึงค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่แตกต่างกันในกรณีที่มีการปรับเปลี่ยนรูปแบบช่องทางไหลของน้ำออกมาได้ ทางออกของท่อทดสอบกำหนดให้มีค่าความดันเกจเท่ากับ 0 ปาสคาล เพื่อเป็นการกำหนดค่าอ้างอิงในการคำนวณค่าความดันสูญเสียในระบบนั่นเอง งานวิจัยนี้จะมีการวิเคราะห์รูปแบบการไหลของน้ำผ่านช่องทางไหลของน้ำในมอเตอร์ทั้งหมด 3 แบบโดยกำหนดให้มีความยาวดังแสดงในภาพที่ 3 โดยแบบที่ 1 จะเป็นรูปแบบดั้งเดิมที่ถูกออกแบบจากภาคอุตสาหกรรม และแบบที่ 2-3 จะเป็นการปรับเปลี่ยนรูปแบบช่องทางไหลของน้ำเพื่อพิจารณาความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อนรวมถึงค่าความดันสูญเสียเนื่องจากการไหลที่เปลี่ยนไป ซึ่งความยาวของช่องการไหลแบบที่ 1 2 และ 3 จะมีค่า 4.47 4.43 และ 3.63 เมตร ตามลำดับ ค่าเหล่านี้จะเป็นตัวแปรสำคัญในการออกแบบช่องทางไหลของน้ำในเปลือกของมอเตอร์ต่อไป



ภาพที่ 3 แบบจำลองการไหลของน้ำ
ในเปลือกมอเตอร์ทั้ง 3 แบบ

2.2 การประมวลผลข้อมูล

เลขเรย์โนลด์ส (Reynolds number, Re) เป็นตัวแปรที่ถูกนำมาใช้ในการบ่งชี้ประเภทการไหลของของไหล โดยรูปแบบการไหลในท่อสามารถแบ่งได้ 3 รูปแบบตามความปั่นป่วนคือ การไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) การไหลแบบเปลี่ยนแปลง (Transitional flow) และการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) เลขเรย์โนลด์สของการไหลในท่อถูกคำนวณได้จาก

$$Re = \frac{\rho U D_h}{\mu} \quad (4)$$

เมื่อ U คือ ความเร็วของของไหล (m/s) และ D_h คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (m) โดยถ้าเลขเรย์โนลด์สของการไหลภายในท่อมีค่าน้อยกว่า 2,300 การไหลจะถูกพิจารณาให้เป็นการไหลแบบราบเรียบ และการไหลที่มีค่าเลขเรย์โนลด์สมากกว่า 10,000 จะเป็นการไหลแบบปั่นป่วน ในระหว่าง 2,300 – 10,000 การไหลจะถูกพิจารณาให้เป็นการไหลแบบเปลี่ยนแปลงตาม [6] โดยที่ D_h หาได้จาก

$$D_h = \frac{4A_c}{p} \quad (5)$$

เมื่อ A_c คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อ (m^2) และ p คือ ความยาวรอบรูปของท่อ (m) ค่าความดันสูญเสีย (Pressure loss) จะถูกพิจารณาดังนี้

$$\Delta P = \frac{f L \rho U^2}{2 D_h} \quad (6)$$

เมื่อ f คือ ค่าตัวประกอบความเสียดทาน และ L คือความยาว (m)

อัตราการถ่ายเทความร้อนจากผิวที่สัมผัสกับน้ำที่ไหลในท่อ Q สามารถหาได้จาก

$$Q = qA_c = Mc_p(T_e - T_i) \quad (7)$$

เมื่อ q คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (W/m^2) M คือ อัตราการไหลเชิงมวลของของไหล (kg/s) c_p คือ ความจุความร้อนของของไหล T_e คือ อุณหภูมิของของไหลที่ทางออกและ T_i คืออุณหภูมิของของไหลที่ทางเข้า ในกรณีที่เงื่อนไขค่าขอบทางความร้อนของผิวท่อถูกกำหนดให้เป็นแบบอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่คงที่เช่นในกระบวนการทดสอบหาขนาดของตาข่ายข้อมูลที่เหมาะสมและกระบวนการสอบเทียบความแม่นยำของแบบจำลองเชิงตัวเลขที่กำลังจะอธิบายในหัวข้อถัดไป ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน h (W/m^2K) สามารถคำนวณได้จาก

$$h = \frac{q}{(T_s - T_m)} \quad (8)$$

เมื่อ T_s คืออุณหภูมิผิวของท่อ T_m คืออุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลที่หน้าตัดหนึ่ง ๆ เงื่อนไขค่าขอบทางความร้อนของผิวท่อจะถูกกำหนดให้เป็นแบบอุณหภูมิคงที่ในการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนของน้ำในเปลือกมอเตอร์ ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะถูกคำนวณได้จาก

$$h = \frac{Q}{A_s \Delta T_{lm}} \quad (9)$$

เมื่อ

$$\Delta T_{lm} = \frac{T_i - T_e}{\ln\left(\frac{T_s - T_e}{T_s - T_i}\right)} \quad (10)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ได้มานี้จะถูกนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าเลขนัสเซลล์ (Nu) ได้จาก

$$Nu = \frac{hD_h}{k} \quad (11)$$

ค่าตัวประกอบสมรรถนะทางความร้อน (Thermal performance factor, TPF) สามารถคำนวณได้จาก

$$TPF = \frac{\left(\frac{Nu}{Nu_0}\right)}{\left(\frac{f}{f_0}\right)^{1/3}} \quad (12)$$

เมื่อ Nu_0 และ f_0 แสดงเลขนัสเซลล์และตัวประกอบความเสียดทานของการไหลของน้ำในช่องทางการไหลรูปแบบที่ 1

3. ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลข

3.1 การสอบเทียบความแม่นยำของแบบจำลองเชิงตัวเลข

งานวิจัยในส่วนนี้นำเสนอผลการสอบเทียบความแม่นยำของแบบจำลองเชิงตัวเลขของการไหลและการแลกเปลี่ยนความร้อนของน้ำในท่อตรงตามภาพที่ 1 ที่เลขเรย์โนลด์ส์เท่ากับ 10,000 12,500 15,000 17,500 20,000 22,500 และ 25,000 โดยผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎีของ Gnielinski [7] ดังนี้

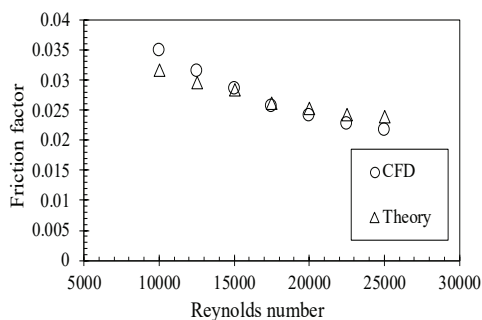
$$Nu = \frac{\left(\frac{f}{8}\right)(Re - 1000)Pr}{1 + 12.7\left(\frac{f}{8}\right)^{0.5}(Pr^{1/3} - 1)} \quad (13)$$

สำหรับ $0.5 \leq Pr \leq 2,000$ และ $3 \times 10^3 < Re < 5 \times 10^6$ เมื่อ Pr คือ เลขแพรนด์เทิล สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน ค่าตัวประกอบความเสียดทานสามารถคำนวณตาม [8] ได้ดังนี้

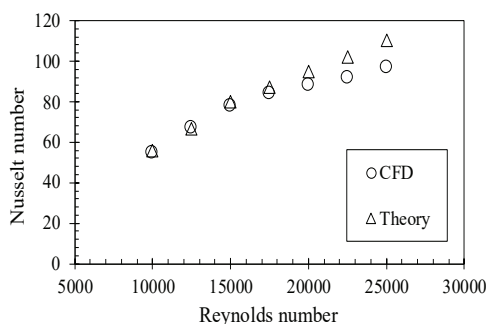
$$f = (0.79 \ln Re - 1.64)^{-2} \quad (14)$$

เมื่อ $3000 < Re < 5 \times 10^6$

จากผลการเปรียบเทียบค่าตัวประกอบความเสียดทานและเลขนัสเซลต์ดังแสดงในภาพที่ 4 และ 5 ตามลำดับ พบว่าค่าตัวประกอบความเสียดทานและเลขนัสเซลต์ที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขมีแนวโน้มเดียวกับผลการคำนวณทางทฤษฎี ตัวประกอบความเสียดทานมีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุดและสูงสุดเท่ากับ 0.97% และ 10.38% ตามลำดับ ในขณะที่เลขนัสเซลต์มีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุดและสูงสุดเท่ากับ 0.29% และ 12.12% ตามลำดับ จากผลการเปรียบเทียบที่ได้ทำให้ทราบว่าแบบจำลองเชิงตัวเลขที่ถูกสร้างขึ้นในงานวิจัยนี้มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการทำนายการไหลและการแลกเปลี่ยนความร้อนของน้ำในเปลือกมอเตอร์ยานยนต์ไฟฟ้าต่อไป



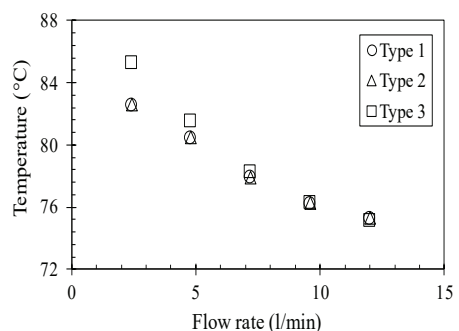
ภาพที่ 4 ผลการสอบเทียบค่าตัวประกอบความเสียดทาน



ภาพที่ 5 ผลการสอบเทียบค่าเลขนัสเซลต์

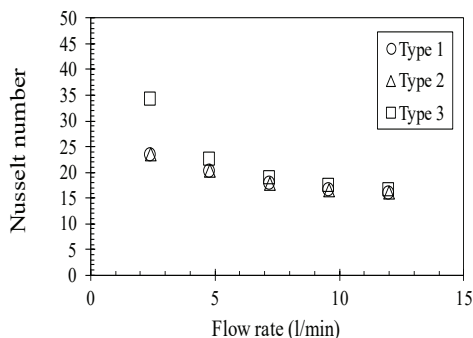
3.2 ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของการไหลของน้ำในเปลือกมอเตอร์ยานยนต์ไฟฟ้า

จากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของการไหลและการแลกเปลี่ยนความร้อนของน้ำในเปลือกมอเตอร์ทั้ง 3 แบบ พบว่าอุณหภูมิของน้ำจะมีค่าสูงขึ้นเมื่ออัตราการไหลของน้ำมีค่าลดลง อุณหภูมิของน้ำที่ทางออกที่สูงที่สุดจะถูกตรวจวัดเมื่ออัตราการไหลของน้ำมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 2.4 ลิตรต่อนาที โดยมีค่าเท่ากับ 82.50 82.60 และ 85.20 องศาเซลเซียส เมื่อช่องทางการไหลเป็นแบบที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ ผลที่ได้แสดงว่าอุณหภูมิของน้ำที่ทางออกของช่องทางการไหลแบบที่ 3 มีค่าสูงสุด และความแตกต่างนี้จะมีค่าลดลงเมื่ออัตราการไหลของน้ำมีค่าสูงขึ้น ที่อัตราการไหลของน้ำสูงสุดเท่ากับ 12 ลิตรต่อนาที ค่าอุณหภูมิของน้ำที่ทางออกมีค่าเท่ากับ 75.24 75.29 และ 75.07 องศาเซลเซียส สำหรับช่องทางการไหลเป็นแบบที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ค่าอุณหภูมิของน้ำที่บริเวณทางออกตามค่าอัตราการไหลของน้ำ

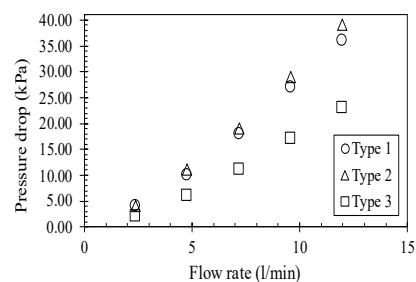
ค่าเลขนัสเซลล์จากการคำนวณภายใต้แบบจำลองทั้ง 3 แบบพบว่า เมื่ออัตราการไหลของน้ำมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 2.4 ลิตรต่อนาที ค่าเลขนัสเซลล์จะมีค่าเท่ากับ 23.42 23.53 และ 34.05 เมื่อช่องทางไหลเป็นแบบที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าช่องทางไหลแบบที่ 3 สามารถแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดีกว่าช่องทางไหลแบบที่ 1 และ 2 อยู่ที่ 45.39% และ 44.71% ตามลำดับ เป็นผลเนื่องมาจากช่องทางไหลแบบที่ 3 มีเส้นทางการไหลแบบ 4 ทางวกกลับส่งผลให้มีการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับช่องทางไหลแบบที่ 2 มี 2 ทางวกกลับและตัวต้นแบบที่เป็นเส้นทางการไหลแบบตรงอย่างเดียว และความแตกต่างนี้จะลดเมื่ออัตราการไหลของน้ำเพิ่มขึ้น โดยที่อัตราการไหลของน้ำสูงสุดเท่ากับ 12 ลิตรต่อนาที ช่องทางไหลแบบที่ 1 2 และ 3 จะมีค่าเลขนัสเซลล์เท่ากับ 15.98 16.01 และ 16.54 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 70



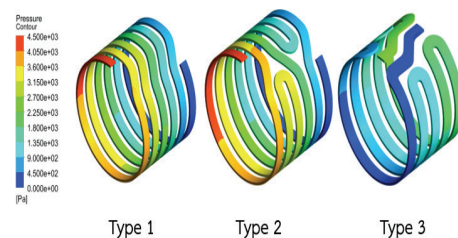
ภาพที่ 7 เลขนัสเซลล์ตามค่าอัตราการไหลของน้ำ

จากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของการไหลของน้ำในช่องทางไหลทั้ง 3 แบบ พบว่าค่าความดันสูญเสียของช่องทางไหลทั้ง 3 แบบ มีค่าสูงขึ้นเมื่ออัตราการไหลของน้ำสูงขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 8 โดยที่อัตราการไหลสูงสุดของน้ำที่ 12 ลิตรต่อนาที ค่าความดันสูญเสียจะมีค่าเท่ากับ 36,531 39,161 และ 23,510 ปาสคาล เมื่อช่อง

ทางการไหลเป็นรูปแบบที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ ผลที่ได้แสดงว่าที่อัตราการไหลของน้ำสูงสุด รูปแบบการไหลแบบที่ 3 จะให้ค่าความดันสูญเสียต่ำสุด และค่าความแตกต่างของความดันสูญเสียนี้นี้จะมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราการไหลของน้ำลดลง โดยที่อัตราการไหลต่ำสุดของน้ำเท่ากับ 2.4 ลิตรต่อนาที ค่าความดันสูญเสียมีค่าเท่ากับ 4,255 4,371 และ 2,538 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 9



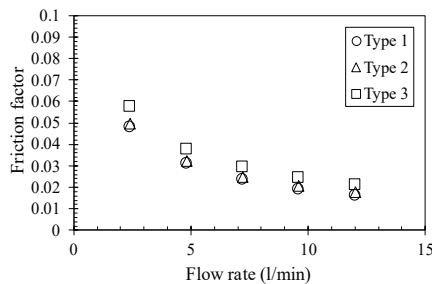
ภาพที่ 8 ค่าความดันสูญเสียตามค่าอัตราการไหลของน้ำ



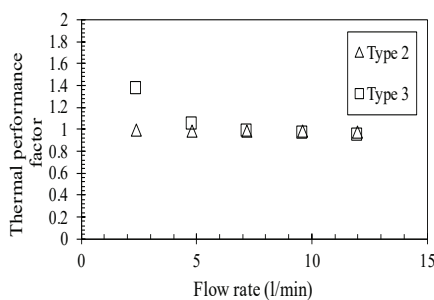
ภาพที่ 9 การกระจายความดันของน้ำในแบบจำลอง 3 แบบ ที่อัตราการไหล 2.4 ลิตรต่อนาที

จากผลการวิเคราะห์ด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณพบว่าค่าตัวประกอบความเสียดทานของแบบจำลองทั้ง 3 แบบจะมีค่าต่ำสุดเมื่ออัตราการไหลของน้ำมีค่าที่สูงสุดเท่ากับ 12 ลิตรต่อนาที ค่าตัวประกอบความเสียดทานของแบบจำลองแบบที่ 1 2 และ 3 จะมีค่าเท่ากับ 0.016 0.018 และ 0.021 ตามลำดับ ผลที่ได้แสดงว่าช่องทางไหลแบบที่ 3 มีค่าตัวประกอบ

ความเสียดทานสูงสุด เมื่อเทียบกับแบบจำลองแบบที่ 1 และ 2 คิดเป็น 31.25% และ 16.67% ตามลำดับ และความแตกต่างนี้เป็นผลเนื่องมาจากช่องทางการไหลแบบที่ 3 มี 4 ทางวกกลับ ส่งผลทำให้เส้นทางไหลมีความโค้งงอมากที่สุดในแบบจำลองทั้ง 3 แบบ และที่อัตราการไหลต่ำสุดเท่ากับ 2.4 ลิตรต่อนาที แบบจำลองแบบที่ 3 จะมีค่าตัวประกอบความเสียดทานสูงที่สุดอยู่ที่ 0.058 ซึ่งมีค่าความแตกต่างคิดเป็น 20.21% และ 15.88% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับแบบจำลองแบบที่ 1 และ 2 ดังแสดงในภาพที่ 10



ภาพที่ 10 ค่าตัวประกอบความเสียดทานตามอัตราการไหลของน้ำ



ภาพที่ 11 ค่าตัวประกอบสมรรถนะทางความร้อนตามอัตราการไหลของน้ำ

4. สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาและออกแบบเชิงตัวเลขของการไหลและการถ่ายเทความร้อนของน้ำภายในระบบระบายความร้อนของมอเตอร์ยานยนต์ไฟฟ้าโดยมีการออกแบบเส้นทางการไหลทั้งหมด 3 รูปแบบ ด้วยการใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ พบว่าแบบจำลองสามมิติแบบที่ 3 สามารถระบายความร้อนได้ดีที่สุดเนื่องจากน้ำที่ด้านทางออกมีค่าอุณหภูมิสูงสุดและให้ค่าเลขนัสเซลล์ที่อัตราการไหล 2.4 ลิตรต่อนาทีเพิ่มขึ้นจากช่องทางไหลแบบที่ 1 และ 2 เท่ากับ 45.39% และ 44.71% ตามลำดับ และค่าเฉลี่ยเลขนัสเซลล์ตลอดช่วงการไหลของเส้นทางการไหลทั้ง 3 รูปแบบจะมีค่าอยู่ที่ 18.79 18.84 และ 21.85 ตามลำดับ ดังนั้นช่องการไหลแบบที่ 3 จะให้เลขนัสเซลล์เฉลี่ยตลอดช่วงไหลสูงกว่าช่องการไหลแบบที่ 1 และ 2 เท่ากับ 16.29% และ 15.98% ตามลำดับ นอกจากนี้รูปแบบการไหลนี้ให้ค่าตัวประกอบความเสียดทานเพิ่มขึ้นจากช่องทางไหลแบบที่ 1 และ 2 เท่ากับ 20.21% และ 15.88% ตามลำดับ จากการคำนวณค่าตัวประกอบสมรรถนะทางความร้อนพบว่าแบบจำลองแบบที่ 3 นี้มีค่าสูงที่สุดคิดเป็น 38.38% เมื่อเทียบกับแบบจำลองที่ 2 ที่อัตราการไหลเท่ากับ 2.4 ลิตรต่อนาทีจากผลที่ได้นี้พบว่า ช่องทางไหลรูปแบบที่ 3 นี้เป็นรูปแบบที่เหมาะสมในการนำมาใช้งานจริง ดังนั้นถ้ามีการนำช่องทางการไหลของน้ำแบบนี้ ไปประยุกต์ใช้ภายในระบบระบายความร้อนของมอเตอร์ยานยนต์ไฟฟ้าแล้วจะสามารถนำไปสู่การเพิ่มประสิทธิภาพของมอเตอร์ยานยนต์ไฟฟ้าได้ต่อไป

- [1] Bangkok Mass Transit Authority (2023). รายงานประจำปีองค์การขนส่งมวลชนกรุงเทพ. องค์การขนส่งมวลชนกรุงเทพ. Available via DIALOG. <http://www.bmta.co.th/sites/default/files/files/download/annual-report-bmta-2557.pdf>. Accessed 23 Feb. 2023. (In Thai).
- [2] Nissan USA (2023). Nissan Product Specs Comparison. Nissan USA. Available via DIALOG. <http://www.nissanusa.com/electric-cars/leaf/versions-specs>. Accessed 23 Feb. 2023.
- [3] Renault (2023). Dimensions & Specifications Renault ZOE e-tech 100% Electric. Renault UK. Available via DIALOG. <https://www.renault.co.uk/vehicles/new-vehicles/zoe/specifications.html>. Accessed 23 Feb. 2023.
- [4] BMW Thailand (2022). Find & Buy. In: เลือก BMW ที่ใช่. BMW Thailand. Available via DIALOG. <http://www.bmw.com/com/en/newvehicles/i/i3/2015/showroom/index.html>. Accessed 23 Feb. 2023. (In Thai).
- [5] Rehman Z, and Seong K (2018). Three-D numerical thermal analysis of electric motor with cooling jacket. *Energies*, 11(1): 92.
- [6] Yunus A, Çengel and Ghajar AJ (2020). *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*. McGraw-Hill Education.
- [7] Gnielinski V (1976). New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow. *Int. Chem. Eng.*, 16(2): 359-368.
- [8] Petukhov BS (1970). Heat transfer and friction in turbulent pipe flow with variable physical properties. In: *Advances in heat transfer* (ed) (Vol. 6, pp. 503-564). New York: Elsevier.
- [9] Ahmed MH (2022). Investigation of the Heat Transfer and Pressure Drop in Tubes with Transverse Ribs of Zigzag Configurations. *Applied Sciences*, 12(11): 5734.